

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平9-17300

(43)公開日 平成9年(1997)1月17日

(51)Int.Cl.

H 01 H 36/00

識別記号

庁内整理番号

F I

H 01 H 36/00

技術表示箇所

J

審査請求 未請求 請求項の数10 OL (全 6 頁)

(21)出願番号 特願平8-82436

(22)出願日 平成8年(1996)4月4日

(31)優先権主張番号 08/493445

(32)優先日 1995年6月22日

(33)優先権主張国 米国(US)

(71)出願人 590002448

ロックウェル・インターナショナル・コーポレーション

ROCKWELL INTERNATIONAL CORPORATION

アメリカ合衆国、90740-8250 カリフォルニア州、シール・ビーチ、シールビーチ・ブルバード、2201

(72)発明者 ユン・ジェイソン・ヤオ

アメリカ合衆国、91360 カリフォルニア州、サウザンド・オークス、ロックフォード・コート、3609

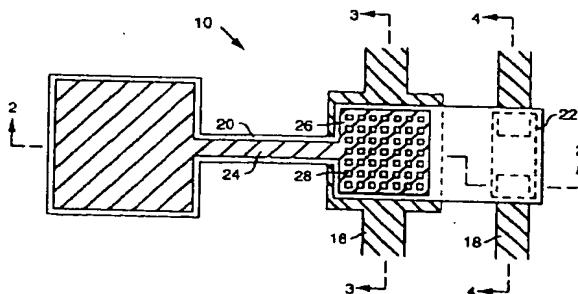
(74)代理人 弁理士 深見 久郎 (外3名)

(54)【発明の名称】 微細電気機械スイッチ

(57)【要約】

【課題】 ギガヘルツ周波数においてオン状態とオフ状態との間に大きな範囲を有しかつ高い電気的分離および低い挿入損でDCからRF周波数まで機能するスイッチを提供する。

【解決手段】 微細電気機械RFスイッチ(10)は片持アクチュエータームとして懸垂式微細梁を用いて基板上に製造される。アンカー構造から、片持アームは基板上にマイクロストリップを含む接地線とギャップを有する信号線との上に延在する。片持アームの下面面上にアンカーから離れて形成された金属接触部は信号線ギャップに面して位置づけられる。アーム上の電極は接地線上方にキャバシタ構造を形成する。キャバシタ構造は、構造上の質量とスイッチ動作中のスクイーズ膜減衰効果とを低減するために、上部電極とアームに延びる穴のグリッドを含む。スイッチは上部電極上の電圧の印加によって動作し、それによって静電力が接地線の方にキャバシタ構造を引きつけ、金属接触部が信号線のギャップを閉じる。



BEST AVAILABLE COPY

【特許請求の範囲】

【請求項1】 基板上に形成された微細電気機械スイッチであって、前記基板上に形成された、アンカー構造と、下部電極と、開回路を形成するギャップを有する信号線と、前記アンカー構造に取付けられかつ前記下部電極および前記信号線ギャップの上に延在する片持アームと、前記片持アーム上に前記アンカー構造から離れて形成されかつ前記信号線の前記ギャップに面して位置づけられる接触部と、前記片持アーム上に形成された上部電極とを含み、前記下部電極より上に位置づけられた前記片持アームと前記上部電極との一部分は、前記上部電極への電圧の選択的印加時に前記下部電極の方に静電気的に引付けることが可能なキャバシタ構造を形成する、微細電気機械スイッチ。

【請求項2】 前記下部電極の方への前記キャバシタ構造の前記静電気的引力は、前記片持アーム上の前記接触部が前記信号線の前記ギャップを閉じることを引き起す、請求項1に記載の微細電気機械スイッチ。

【請求項3】 前記基板は半絶縁性G a A s 基板を含む、請求項1に記載の微細電気機械スイッチ。

【請求項4】 前記片持アームは絶縁性材料を含む、請求項1に記載の微細電気機械スイッチ。

【請求項5】 前記片持アームは二酸化シリコンを含む、請求項1に記載の微細電気機械スイッチ。

【請求項6】 前記キャバシタ構造はさらに、前記片持アームおよび上部電極に延びる穴のグリッドを含み、前記穴は、前記片持アームの構造上の質量とスイッチの動作の間の空気のスクイーズ膜減衰効果とを低減する、請求項1に記載の微細電気機械スイッチ。

【請求項7】 前記下部電極および信号線は基板上に金のマイクロストリップを含む、請求項1に記載の微細電気機械スイッチ。

【請求項8】 前記接触部は金、白金、および金バラジウムからなる群から選択された1つの金属を含む、請求項1に記載の微細電気機械スイッチ。

【請求項9】 前記片持アームは $1\text{ }\mu\text{m} \sim 10\text{ }\mu\text{m}$ の範囲の厚みを有する、請求項1に記載の微細電気機械スイッチ。

【請求項10】 前記片持アームは、アンカー構造からキャバシタ構造まで $10\text{ }\mu\text{m} \sim 1000\text{ }\mu\text{m}$ の範囲の長さを有する、請求項1に記載の微細電気機械スイッチ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【技術分野】 この発明は、微細電気機械システム (micro electromechanical system (MEMS)) に関し、特に、DCから少なくとも4ギガヘルツまでの信号周波数で機能する微細に機械加工された電気機械RFスイッチに関する。

【0002】

【発明の背景】 電気スイッチは、信号経路指定装置、インピーダンス整合ネットワーク、および調整可能利得増幅器を含む多くの電気通信アプリケーション用のマイクロ波およびミリメートル波集積回路 (MM I C) において広く用いられている。先行技術は一般的に、たとえばG a A s M E S F E T およびP I Nダイオードなどの複合固体スイッチに依存している。しかしながら、トランジスタを用いる従来のR Fスイッチは典型的には、低い破壊電圧 (たとえば30V)、比較的高いオン抵抗 (たとえば 0.5Ω)、および比較的低いオフ抵抗 (たとえば100メガヘルツで $50\text{ k}\Omega$) を与える。信号周波数がおよそ1ギガヘルツを超えると、固体スイッチは「オン」状態 (すなわち閉回路) では大きな (典型的には1dBのオーダーの) 挿入損を受け、「オフ」状態 (すなわち開回路) では質の良くない (典型的には-30dBよりひどい) 電気的分離を受ける。

【0003】 電気通信アプリケーション用のスイッチには、R F方式 (regime) のオン状態インピーダンスとオフ状態インピーダンスとの間に大きなダイナミックレンジが必要である。微細機械加工技術を用いて製造されたR Fスイッチは従来のトランジスタよりも大型の機械スイッチのように機能するが、嵩がなく高いコストもからならないために有利であり得る。しかしながら、接触電極が互いに近接するために、機械加工された集積R Fスイッチを実現するのは難しい。大きなオフ/オンインピーダンス比を達成するには、スイッチがオン (閉回路) のときには最小の抵抗を伴う良好な電気的接触が必要になり、スイッチがオフ (開回路) のときには低い寄生容量結合が必要になる。R F方式では、非常に電極が近接していると、スイッチがオフ状態のとき信号が接触電極間で結合されてしまい、結果として低いオフ状態抵抗を生む。1ギガヘルツよりも上の周波数でオンからオフへのインピーダンスのダイナミックレンジが欠けていることが、従来のトランジスタベースのスイッチならびに既知の小型電気機械スイッチおよび繼電器の大きな制限点である。このため、電気通信システムにおいて、DCから少なくとも4ギガヘルツまでの信号周波数においてオンからオフに大きなダイナミックインピーダンスレンジを与える微細電気機械スイッチが必要である。

【0004】

【発明の概要】 この発明は、ギガヘルツ信号周波数を扱い、一方で「オン」状態において最小の挿入損および「オフ」状態において質の良い電気的分離を維持できる微細に製造された小型電気機械R Fスイッチを含む。好ましい実施例では、R Fスイッチは、半絶縁性ガリウム砒素 (G a A s) 基板上に製造され、片持架式のアクチュエータアームとして懸垂式二酸化シリコン微細架を備える。片持アームは、基板上に金属マイクロストリップによって形成された接地線およびギャップを作られた信

号線の上に延在するようにアンカー構造に取付けられている。好ましくは白金、金、または金バラジウムなどの容易に酸化しない金属を含む金属接触部が片持アームの下部にアンカー構造から離れて形成され、信号線のギャップより上でかつそれに面して位置づけられている。片持アーム上の上部電極は、基板上の接地線より上にキャバシタ構造を形成する。キャバシタ構造は上部電極および片持アームを貫いて延びる穴のグリッドを含み得る。好ましくは片持アームと下部電極との間のギャップに匹敵する寸法を有する穴は、構造上の質量、およびスイッチ動作の間の片持アームと基板との間の空気のスクイーズ膜減衰効果 (squeeze film damping effect) を低減する。スイッチは上部電極への電圧の印加によって動作する。電圧が印加されると、静電力がキャバシタ構造を接地線の方に引きつけ、それによって金属接触部が信号線のギャップを閉じることを引き起こす。スイッチはDCから少なくとも4ギガヘルツまで機能し、4ギガヘルツにおける電気的分離は-50dBであって、挿入損は0.1dBである。5つのフォトマスクを用いる低温処理 (250°C) は、スイッチがマイクロ波およびミリメートル波集積回路 (MMIC) とモノリシックに集積されることを可能にする。微細電気機械RFスイッチは、マイクロ波およびミリメートル波IC設計のための信号経路指定、MEMSインピーダンス整合ネットワーク、ならびに周波数に敏感な通信のためのバンド切換同調可能フィルタを含む電気通信におけるアプリケーションを有する。

【0005】この発明の原形に示されたように、微細電気機械RFスイッチは28ボルト (~50nAまたは1.4μW) で通常のオフ状態(開回路)からオン状態(閉回路)に切換られ、どちらの状態においてもほぼゼロ電力で維持され得る。周囲雰囲気においては、スイッチの閉時間は30μsのオーダーにある。スイッチの二酸化シリコンの片持アームは650億サイクル (6.5 × 10¹⁰) にわたって応力テストされたが、疲労効果は観察されなかった。1μm × 20μmの最も狭い金線の断面寸法では、スイッチは少なくとも250mAの電流を扱うことができる。

【0006】この発明の主要な目的は、ギガヘルツ周波数においてオン状態インピーダンスとオフ状態インピーダンスとの間に大きな範囲を有するRFスイッチである。この発明の特徴は、静電気的に動作される片持アームを有する微細電気機械スイッチである。この発明の利点は、高い電気的分離および低い挿入損でDCからRF周波数まで機能するスイッチである。

【0007】この発明のより完全な理解のためおよびそのさらなる利点のために、好ましい実施例の以下の詳しい説明は添付図面を参照する。

【0008】

【好ましい実施例の詳しい説明】この発明は、DCから

少なくとも4ギガヘルツまでの信号周波数を有するアプリケーション用に設計された小型RFスイッチを含む。図1は、基板上に微細機械加工された電気機械RFスイッチ10の概略上面図を示す。図2、3、および4は、図1の切断線2-2、3-3、および4-4、それぞれに沿ったスイッチ10の断面図を示す。微細機械加工された小型のスイッチ10は、マイクロ波およびミリメートル波IC設計のための信号経路指定、MEMSインピーダンス整合ネットワーク、および調整可能利得増幅器を含む電気通信システムのアプリケーションを有する。

【0009】好ましい実施例では、スイッチ10は、たとえばマスキング、エッティング、堆積、およびリフトオフなどの一般的に既知の微細製造技術を用いて半絶縁性GaN基板などの基板12上に製造される。スイッチ10はアンカー構造14によって基板12に取付けられ、アンカー構造14はたとえば堆積かまたは周囲の材料をエッティングして取除くかによって基板12上にメサ型として形成され得る。典型的には接地に接続された下部電極16、および信号線18もまた、基板12上に形成される。電極16および信号線18は一般的に、基板12上に堆積された、たとえば金などの容易に酸化しない金属のマイクロストリップを含む。信号線18は図4に最も示されているようなギャップ19を含み、ギャップ19は矢印11によって示されているようにスイッチ10の動作によって開けられたり閉じられたりする。

【0010】スイッチ10の動作部分は、典型的にはたとえば二酸化シリコンまたは窒化シリコンなどの半導電性、半絶縁性、または絶縁性材料からなる片持梁式のアーム20を含む。片持アーム20は、アンカー構造14の上面の一方端に取付けられかつ基板12の上の下部電極16および信号線18より上で延在する、懸垂式マイクロビームを形成する。典型的には容易に酸化しないたとえば金、白金、または金バラジウムなどの金属を含む電気的接触部22は、片持アーム20のアンカー構造14から離れた端部上に形成される。接触部22は、信号線18のギャップ19上で延在して基板12の上面に面するよう片持アーム20の下側に位置づけられる。

【0011】典型的にはたとえばアルミニウムまたは金などの金属を含む上部電極24は片持アーム20の上面に形成される。上部電極24は、アンカー構造14より上から始まって片持アーム20の上面に沿って延び下部電極16より上の位置で終端する。片持アーム20および上部電極24は下部電極16より上で幅広くなりキャバシタ構造26を形成する。スイッチ動作性能を高めるための選択案として、キャバシタ構造26は、上部電極24および片持アーム20を貫いて延びる穴のグリッド28を含むように形成され得る。典型的にはたとえば1μm～100μmの寸法を有する穴は、片持アーム20の構造上の質量と、矢印11によって示されているよ

うなスイッチ10の動作の間の空気のスクイーズ膜減衰効果とを低減する。

【0012】動作において、スイッチ10は図2に示されているように通常「オフ」位置にある。オフ状態のスイッチ10では、信号線18はギャップ19と接触部22の信号線18からの分離とに起因して開回路である。スイッチ10は上部電極24への電圧の印加によって「オン」位置に動作する。絶縁性の片持アーム20によって下部電極16から分離されている上部電極24およびキャバシタ構造26への電圧で、静電力がキャバシタ構造26（および片持アーム20）を下部電極16の方に引きつける。矢印11によって示されるような下部電極16の方への片持アーム20の動作によって、接触部22が信号線18と接触するようになり、それによってギャップ19を閉じて信号線18をオン状態にする（すなわち回路を閉じる）。

【0013】（設計トレードオフ）以下の説明は、例であって、限定するものではないが、微細電気機械スイッチ10を構成する上でさまざまな部品寸法および設計トレードオフを説明する。RFスイッチ10の一般的な設計に関して、二酸化シリコン片持アーム20は典型的には、 $10\text{ }\mu\text{m}$ から $1000\text{ }\mu\text{m}$ までの長さであって、 $1\text{ }\mu\text{m}$ から $100\text{ }\mu\text{m}$ までの幅、 $1\text{ }\mu\text{m}$ から $10\text{ }\mu\text{m}$ までの厚みである。キャバシタ構造26は $100\text{ }\mu\text{m}^2$ から 1 mm^2 までの典型的な面積を有する。二酸化シリコン片持アーム20の下面と基板12上の金属線16および18との間のギャップは典型的には $1\text{ }\mu\text{m}$ ～ $10\text{ }\mu\text{m}$ である。金マイクロストリップ信号線18は、所望の信号線インピーダンスを与えるために一般的に厚み $1\text{ }\mu\text{m}$ ～ $10\text{ }\mu\text{m}$ 、幅 $10\text{ }\mu\text{m}$ ～ $1000\text{ }\mu\text{m}$ である。金接触部22は典型的には厚み $1\text{ }\mu\text{m}$ ～ $10\text{ }\mu\text{m}$ であって、 $10\text{ }\mu\text{m}$ ～ $1000\text{ }\mu\text{m}^2$ の接触面積を有する。

【0014】低信号周波数では、スイッチ10の挿入損は、信号線18の抵抗と接触部22の抵抗とを含む信号線18の抵抗損によって支配される。より高い周波数では、挿入損は抵抗損と表皮深さ効果（skin depth effect）との両方の結果として生じる。4ギガヘルツより以下の周波数では、表皮深さ効果は信号線18の抵抗損と比較するとはるかに小さい。抵抗損を最小にするために、金の厚い（たとえば $2\text{ }\mu\text{m}$ ）層が用いられる。金はまた、その優れたエレクトロマイグレーション特性のためにも好ましい。信号線18の幅はその厚みよりもより限定される。なぜなら幅のある信号線は、より低い挿入損を生成するにもかかわらず、信号線間の容量結合の増大に起因してより不良なオフ状態電気的分離を生み出すからである。さらに、マイクロストリップ信号線の寸法の変化はマイクロ波インピーダンスにも影響を及ぼす。

【0015】オフ状態のスイッチ10の電気的分離は、基板が導電性であろうと半導電性であろうとも、主とし

て信号線間のまたは信号線と基板との間の容量結合に依存する。ゆえに、RFスイッチ10には半絶縁性G a A s基板が半導電性シリコン基板よりも好ましい。RFスイッチ10がMMICとのモノリシックな集積能力を保持し得るように、G a A s基板はまた、ガラスなどの他の絶縁性基板よりも好ましい。

【0016】信号線間の容量結合は、基板12上の信号線18と懸垂式二酸化シリコン片持アーム20の下面上の金属接触部22との間のギャップを増大することによって低減され得る。しかしながら、ギャップが増大することによってまた、スイッチ10の動作に要する電圧が増大する。なぜならそのギャップが構造26のキャバシタンスに影響を及ぼすからである。キャバシタ構造26のアルミニウム上部金属24は下層の接地メタライゼーション16に結合する。固定されたギャップ距離では、スイッチ10の動作に要する電圧は動作キャバシタ構造26の面積を増大することによって低減され得る。しかしながら、キャバシタ面積を増やすことによって、懸垂式構造の全質量が増大し、このためスイッチ10の閉時間が増大する。構造の質量の増大を補償するために懸垂式構造の剛性を増大させて一定のスイッチ閉時間を維持するようにすれば、スイッチ10の動作に要する電圧はさらに増大するであろう。さらに、得られる挿入損を最小にするために、二酸化シリコン片持アーム20上の接触部22はまた厚みを最大にして抵抗損を低減する必要があるが、厚みのある金属接触部22もまた全質量に寄与する。

【0017】RFスイッチ10の装置パラメータ間のトレードオフを管理するとき、挿入損および電気的分離が一般的に最優先され、閉時間および動作電圧が次に優先される。好ましい実施例では、RFスイッチ10の挿入損および電気的分離はそれぞれ、4ギガヘルツにおいて 0.1 dB および -50 dB になるように設計されており、一方スイッチ閉時間は $30\text{ }\mu\text{s}$ のオーダーにあり動作電圧は28ボルトである。

【0018】動作キャバシタ構造26において選択的に設けられる穴のグリッド28は、グリッド構造の周囲の電界に依存することによって全動作キャバシタンスを維持しながら構造上の質量を低減する。さらに、穴のグリッド28は、スイッチ10が動作しているとき片持アーム20と基板12との間の大気のスクイーズ膜減衰効果を低減する。穴のグリッド28を備えないスイッチは一般的に、スクイーズ膜減衰効果に起因して非常に大きくなる開閉時間を有する。

【0019】（製造）この発明のRFスイッチ10は5つのマスキングレベルを用いる表面微細製造技術によって製造される。いかなる厳密な重ね合わせも必要でない。好ましい実施例の開始時の基板は3インチの半絶縁性G a A sウェハである。プラズマ励起化学蒸着（P E CVD）を用いて堆積された二酸化シリコン（S i

O_2) が片持アーム20に好ましい構造材料として用いられ、ポリイミドが好ましい犠牲材料として用いられる。図5 (A) - (E) よび図6 (A) - (E) は、それぞれ図1に示されたスイッチ10の断面3-3および4-4にプロセスのシーケンスが影響を及ぼすときのそのプロセスシーケンスの断面概略図である。スイッチ10のSiO₂ PECVD形成の間の処理温度を250°Cと低くすることによって、MMICとのモノリシックな集積能力を確実にする。

【0020】アンカー構造14は多くの異なるエッティング技術および/または堆積技術を用いて製造されてもよい。図2に示されたような突出アンカー構造14を形成するには、典型的にはアンカーの面積が片持アーム20の寸法よりずっと大きくなければならない。一方では、片持アーム20は基板12上に堆積された犠牲層の上部上に形成される。たとえば酸素プラズマを用いることによって片持アーム20がリリースされ横方向に犠牲層を除去するとき、アンカー構造14を形成する犠牲材料はアンダーカットされるが完全には除去されない。別の方針においては、片持アーム20を形成する材料の堆積に先行してエッティングステップが用いられて犠牲層に凹領域を生み出し、そこにアンカー構造14が形成される。この構成では、片持アーム20の材料は實際には犠牲層のエッティングされた凹領域の基板12の上に堆積され、アンカー構造14を形成する。

【0021】片持アーム20、電極16および18、ならびに接触部22を形成するとき、(たとえばDuPont PI2556などの)熱硬化ポリイミドの層30などの犠牲材料が基板12上に堆積される。ポリイミドは、250°C以下の温度において数回のオープンベーキングによって硬化され得る。そして、第1の犠牲材料から選択的に取除かれ得る(たとえばOCG Probe imide285などの)予めイミド化されたポリイミドの層32などの第2の犠牲材料が堆積される。OCG

Probe imide285は回転加工され170°Cの最も高いベーキング温度でベーキングされ得る。そして1500Åの厚みの塗化シリコン層34が堆積され、CHF_xとO₂との化学作用での反応性イオンエッティング(RIE)およびフォトリソグラフィを用いてバターニングされる。このパターンは、図6 (A)において最も示されているようにO₂ RIEによって下層ポリイミド層の方にさらに転写する。これは、ポリイミドの2層が用いられる点を除いて、3層のレジストシステムと同様のリフトオフプロファイルを生み出す。図5

(B) よび図6 (B) に示されるように、金の層が熱硬化ポリイミド層30の厚みと等しい厚みで電子ビーム蒸着され、下部電極16および信号線18を形成する。図6 (B) に最も示されるように、予めイミド化されたOCG ポリイミドを溶解するために塩化メチレンを用いて金のリフトオフが完了し、平坦な金/ポリイミド

表面を残す。架橋したDuPontポリイミド30は塩化メチレンに対して良好な耐薬品性を有する。

【0022】(たとえばDuPont PI2555などの)熱硬化ポリイミドの第2の層38が回転加工され熱的に架橋される。1 μmの金の層が、図6 (C) に最も示されるように、電子ビーム蒸着およびリフトオフを用いて堆積され、接触金属22を形成する。そして図5 (D) よび図6 (D) に示されるように、2 μmの厚みのPECVD二酸化シリコンの膜が堆積され、CHF_xとO₂との化学作用においてRIEおよびフォトリソグラフィを用いてバターニングされ、片持アーム20を形成する。そして図5 (D) に示されるように、アルミニウム膜の薄い(2500 Å)層が電子ビーム蒸着およびリフトオフを用いて堆積され、動作キャバシタ構造に上部電極24を形成する。最後に、Branson O₂パレルエッチャーにおいてポリイミド膜30および38をドライエッティングすることによって全RFスイッチ構造がリリースされる。起り得る粘着性の問題を回避するにはドライリリースがウェット化学リリース方法よりも好ましい。

【0023】(テスト結果) 上述のように製造された懸垂式スイッチ構造の剛性はさまざまな片持寸法に対して0.2 N/m~2.0 N/mであるように設計される。最低必要動作電圧は28ボルトであり、動作電流は50 nAのオーダーにある(これは1.4 μWの電力消費に対応する)。4ギガヘルツにおける-50 dBの電気的分離および0.1 dBの挿入損が達成される。静電気的動作のために、スイッチ10は、その位置をオン状態またはオフ状態いずれかに維持するためにほぼ0電力を必要とする。スイッチ閉時間は30 μsのオーダーにある。二酸化シリコン片持アーム20は全部で650億サイクル(6.5×10^{10})にわたって応力テストされたが疲労効果は観察されなかった。最も狭い金信号線18の断面寸法は1 μm × 20 μmで、原形のスイッチ10の電流処理能力は200 mAであった原形のスイッチのDC抵抗は0.22 Ωであった。すべての特性は周囲雰囲気において行なわれる。

【0024】この発明の範囲内にあるさまざまな変更および修正を当業者によって行なわれることができる。特に、基板、アンカー構造、片持アーム、電極、および金属接触部は、所与の最終的使用の設計に適切なさまざまな材料のいずれを用いても製造され得る。さらに、アンカー構造、片持アーム、キャバシタ構造、および金属接触部は、複数のアンカーポイント、片持アーム、および金属接触部を含むさまざまな表面形状において形成されてもよい。

【図面の簡単な説明】

【図1】この発明の微細電気機械スイッチの上面図である。

【図2】切断線2-2に沿った図1のスイッチの断面図

である。

【図3】切断線3-3に沿った図1のスイッチの断面図である。

【図4】切断線4-4に沿って切取られた図1のスイッチの断面図である。

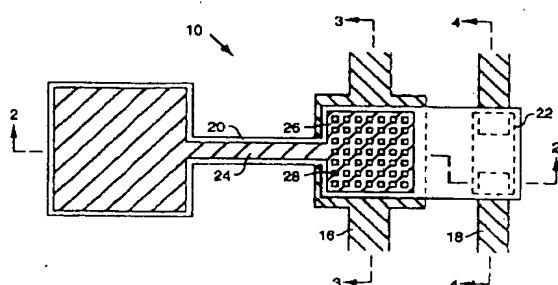
【図5】(A)-(E)は、図3に示されたスイッチの断面を製造するまでのステップを示す断面図である。

【図6】(A)-(E)は、図4に示されたスイッチの断面を製造するまでのステップを示す断面図である。*

*【符号の説明】

- 10 微細電気機械スイッチ
- 14 アンカー構造
- 16 下部電極
- 18 信号線
- 20 片持アーム
- 22 接触部
- 24 上部電極

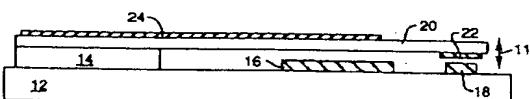
【図1】



【図3】

【図4】

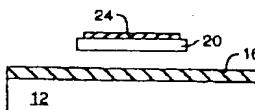
【図2】



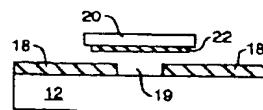
【図6】



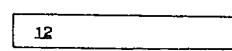
(A)



12



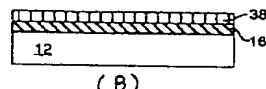
12



(D)



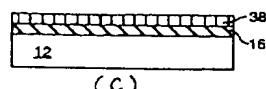
(E)



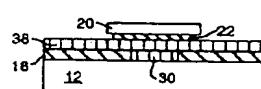
(F)



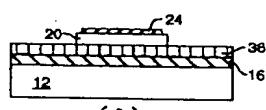
(G)



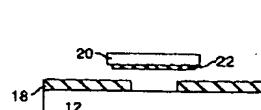
(H)



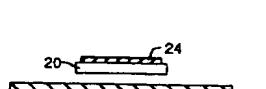
(I)



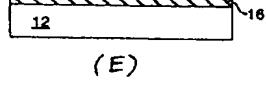
(J)



(K)



(L)



(M)